

多機系統の過渡動揺時に適用する簡易位相検出システム

胡 敏美・一柳勝宏・小木曾理一・小林英夫

Simple Type Phase Detection System Applied on Multimachine Power System during Transient Period

Minyou HU, Katsuhiro ICHIYANAGI,
Riichi OGISO, Hideo KOBAYASHI

In multimachine power system, there is very difficulty to measure the phase angle between each generators which distance is far away. In this paper, equivalent one machine to infinite bus system is applied and two methods to detect phase angle are showed.

The first is equivalent reactance method, in which after the estimation of equivalent reactance of power system, this equivalent reactance is used to detect phase angle swing during transient time. Three models used to detect phase angle are compared concerning the approximation to the true value and the error of equivalent reactance is estimated. This method is effective in low and medium load state conditions. In heavy load state condition, the phase angle swing is largely disturbed by the reaction between generators, so the error in case of using equivalent reactance method is large.

The second method based on observer theory with the equivalent reactance method jointly is developed. Equivalent nonlinear generator's model and two type of observed values (active power P_e or angle velocity ω) in the method are used to estimate the phase angle swing of generator. The result is that ω type's feedback has a bigger range than P_e type's feedback concerning feedback gain choosing. The method based on observer using the equivalent reactance has a good result specially in heavy load state condition compared with the first method using equivalent reactance method.

1. まえがき

電力系統の各発電機間の位相差は系統の安定運転に対して重要な状態変数の一つである。単純な一機無限大母線系統において発電機端の情報のみによる過渡時の位相検出は比較的容易に行える¹⁾。しかし、多機系統では個々の発電所はたがいに分散しているため、実際の系統ではそれらの位相差の検出は一機無限大母線系の場合と比較して困難と思われる。発電機の位相変動がその発電機端子の観測量のみを利用して直接に検出することができれば、この位相情報は電力系統の運転レベルの向上や安定化制御に対して有益になると考えられる。

多機系統において、位相検出の対象とする発電機は系統の電氣的な中心から遠く離れた所に設置されている場合が多い。このような場合には元の多機系統を一機無限大母線系統の簡単なモデルで置きかえる事の可能性が考え

られる。本報告で提案する位相検出法は、まず多機系統について位相検出の対象とする発電機からみた等価リアクタンスをその発電機端子の有効電力および無効電力などの情報量を用いて推定する。次に、この等価リアクタンスを用いて得られる等価一機無限大母線系統から位相を検出する。これが簡易位相検出システム(Simple-Type Phase Detector, 以下において、SPD と略す)の原理である。

具体的に六機系統モデルを用いて、SPD の検討を行っているが、中程度以下の負荷レベルにおいて、比較的良好的な結果が得られている。しかし、系統の重負荷状態での事故が苛酷な場合には、他の発電機の動揺の影響を大きく受けるため、位相検出に大きな誤差を生ずることがある。従って、前述の等価リアクタンス法に、オブザーバの原理を併用することによる位相検出システム(以下

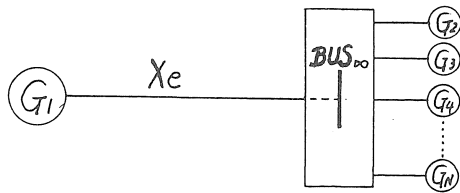


図1 多機系統の等価モデル

において、OBS と略す)を提案する。種々の運転状態及び故障遮断時間に対し、発電機の有効電力あるいは角速度を観測量とした場合を仮定し、あらかじめ最適なフィードバックゲインの値をテーブルとして用意しておく、動揺発生の瞬時にこれを選択して利用することにより、オンライン位相検出の可能性について検討を行ったので、ここに報告する。

2. 等価リアクタンスによる発電機位相差の検出

<2-1> 等価リアクタンス法

図1に示すように、位相検出の対象とする発電機 G_1 が長距離の送電線を介して、一般の多機系統に連系される場合を考える。ここで、系統を一機無限大母線系で表わしたとき、仮想無限大母線 BUS_∞ が存在するものとし、 G_1 の位相はこの BUS_∞ の電圧 V_∞ との電圧位相差に等しいものとする。

G_1 の端子における有効、無効電力 P 、 Q はそれぞれ次式で表わすことができる。

$$P = (E V_\infty / X_e) \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = E^2 / X_e - (E V_\infty / X_e) \cos \delta \quad (2)$$

ここで、 E 、 δ はそれぞれ発電機端の電圧と位相、 X_e は発電機から無限大母線までの等価リアクタンスである。(1)、(2)式で、 G_1 端子において、 P 、 Q 、 E は測定可能であり、 V_∞ 、 δ および X_e は測定不可能である。従って、 $V_\infty = 1.0 [P.U.]$ と仮定することにより、 δ は X_e を未知パラメータとして、次のような(3)、(4)、(5)式のいずれかにより求めることができる。

$$\delta_p = \sin^{-1} (P X_e / E) \quad (3)$$

$$\delta_q = \cos^{-1} \{ (E^2 - Q X_e) / E \} \quad (4)$$

$$\delta_t = \tan^{-1} \{ P X_e / (E^2 - Q X_e) \} \quad (5)$$

この位相差は発電機端子からみた無限大母線との両電圧の位相差である。これを発電機内部からみた位相差として検出するには(3)~(5)式の E を内部電圧に置き換え、 Q を発電機端子で測定した無効電力の値に発電機リアクタンスによる無効電力消費分を加えたもので置き換えるものとする。

従って、等価リアクタンス X_e を推定し、さらに、得られた X_e を用いて位相差 δ を検出することができる。位

相検出の対象となる発電機端子において周波数偏差 Δf は測定できるので、これを用いて系統故障除去時刻 t_0 以後の位相角の偏差 $\Delta \delta(t)$ は次式により求められる^{1)~3)}。

$$\Delta \delta(t) = 2\pi \int_{t_0}^t \Delta f dt \quad (6)$$

また、推定値 X_e の値が与えられると、動揺初期 $t_0 \sim t_1$ における(3)、(4)、または(5)式から得られる各 δ の偏差 $\widehat{\Delta \delta}$ が次式により計算できる。

$$\widehat{\Delta \delta} = \widehat{\delta}(t_1) - \widehat{\delta}(t_0) \quad (7)$$

従って、次式の評価関数 S を最小とするような X_e が等価リアクタンスとして得られる。

$$S = \int_{t_0}^{t_1} (\Delta \delta - \widehat{\Delta \delta})^2 dt \quad (8)$$

<2-2> モデル系統と適用例

多機電力系統における簡易位相検出システムを計算機シミュレーションにより検討するための六機系統モデルを図2に示す⁴⁾。

図に示す負荷の潮流レベルを A として、その $1/2$ 負荷の潮流レベルを B とする。 G_∞ を無限大母線とし、位相検出の対象となる発電機を G_1 とする。擾乱として G_1 発電機の近傍における送電線の一回線三相短絡事故を想定し、この事故発生から事故回線除去までの故障継続時間をそれぞれ 0.1 秒と 0.05 秒とする。計算機シミュレーションでは発電機の同期リアクタンス背後の内部端子からみた位相変化と発電機端子の外部端子からみた位相変化について、それぞれ計算を行っている。

なお、故障除去直後の微小時間内に、式(3)、(4)、(5)のどれか一つと(6)~(8)式を組み合わせる等価リアクタンスの最良推定値 X_e を求める。

表1は六機系統モデルについて二種の負荷の潮流レベルや二種の故障継続時間に対し、等価リアクタンス推定のための時間 $t_1 - t_0$ を変化させた場合に得られた X_e の値を示す。

ここで、 X_{ep} は(3)式を用いて得られた推定値を表わし、 X_{eq} 、 X_{et} はそれぞれ(4)、(5)式を用いて得られた推定値を表わす。

表中の各ケースの符号についてそれぞれ

A 、 B : 全負荷と半負荷

E 、 U : 発電機の内端子と外端子

10、05 : 故障継続時間が 0.1 と 0.05 秒であることを示す。たとえば、“AE10”は A の潮流状態で発電機の内端子からみること及び故障継続時間が 0.1 秒であることを示している。

表からみると、推定時間の 0.33 秒後に、等価リアクタンスの推定値はほぼ一定な値として得られていることがわかる。また表中の位相変動幅の項は位相角の真値の変

表 1 六機系統の等価リアクタンス値の推定

ケース	潮流状態	故障継続時間(秒)	推定端子	位相変動幅(rad)	X_{ep}			X_{eq}			X_{et}		
					推定時間(秒)			推定時間(秒)			推定時間(秒)		
					0.15	0.33	0.50	0.15	0.33	0.50	0.15	0.33	0.50
BE10	半	0.10	内	1.00-1.30	5.4	5.2	5.2	6.2	5.4	5.4	6.4	5.6	5.6
BU10	半	0.10	外	0.36-0.56	2.0	1.4	1.4	位相検出不可			2.2	1.4	1.4
BE05	半	0.05	内	1.00-1.18	5.6	5.2	5.2	6.2	5.4	5.4	6.4	5.6	5.6
BU05	半	0.05	外	0.36-0.55	1.8	1.4	1.4	位相検出不可			2.2	1.6	1.6
AE10	全	0.10	内	1.50-2.35	位相検出不可			6.2	5.4	5.4	6.2	5.8	6.6
AU10	全	0.10	外	0.58-1.36	1.6	1.6	1.6	3.8	3.8	3.8	2.2	2.2	2.2
AE05	全	0.05	内	1.40-2.50	位相検出不可			6.2	5.6	5.6	6.6	5.8	5.8
AU05	全	0.05	外	0.70-1.40	1.8	1.4	1.4	3.2	0.4	0.4	2.4	1.8	1.6

X_{ep} , X_{eq} , X_{et} は(3), (4), (5)式により推定した等価リアクタンスである。

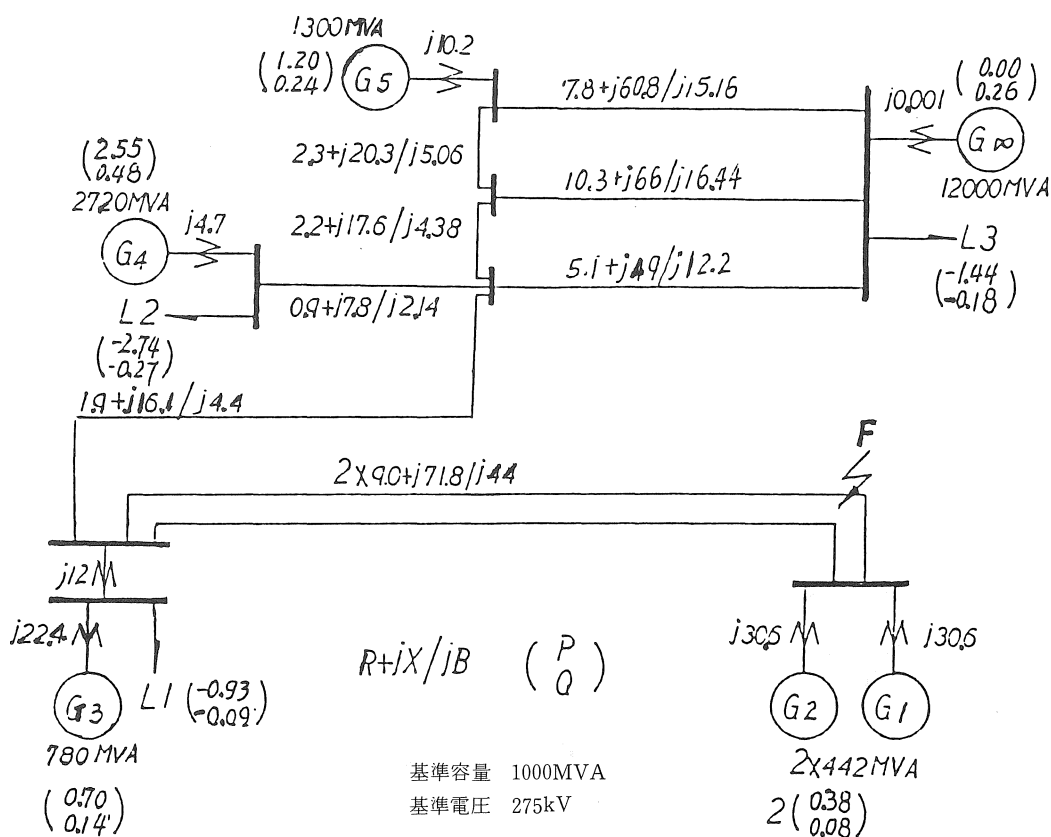


図 2 六機系統モデル

動範囲を示している。これによって、各モデルによる位相検出の結果に違いがあることがわかる。たとえば、大きい位相変動幅のAE10とAE05の場合には、(3)式による推定結果はよくなく、 X_{ep} による位相検出ができない。小さい位相変動幅のBU10とBU05の場合には、(4)式の

X_{eq} による位相検出ができていない。しかし、(5)式による X_{et} のモデルではいつでも位相が検出できる。このことは、位相検出式から導いた次式から理解される。

$$\partial \delta_p / \partial P = (X_{ep}/E)(1/\cos \delta_p) \quad (9)$$

$$\partial \delta_q / \partial Q = -(X_{eq}/E)(1/\sin \delta_q) \quad (10)$$

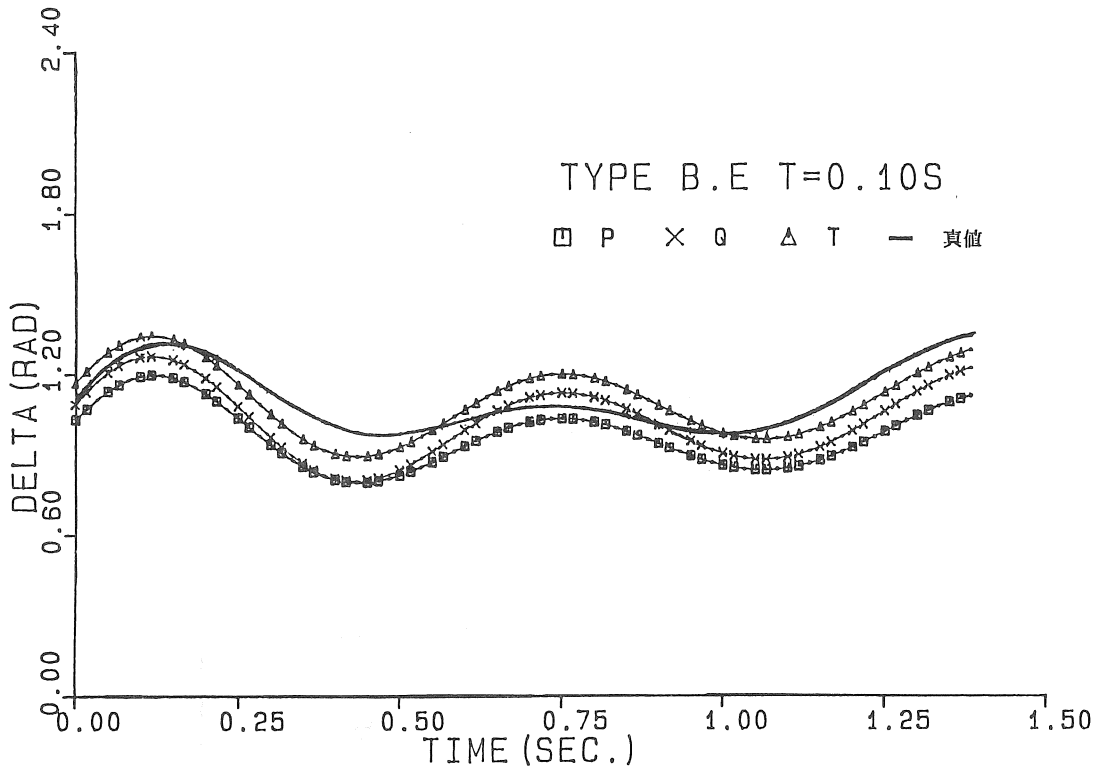


図3 等価リアクタンス推定による位相検出推移曲線

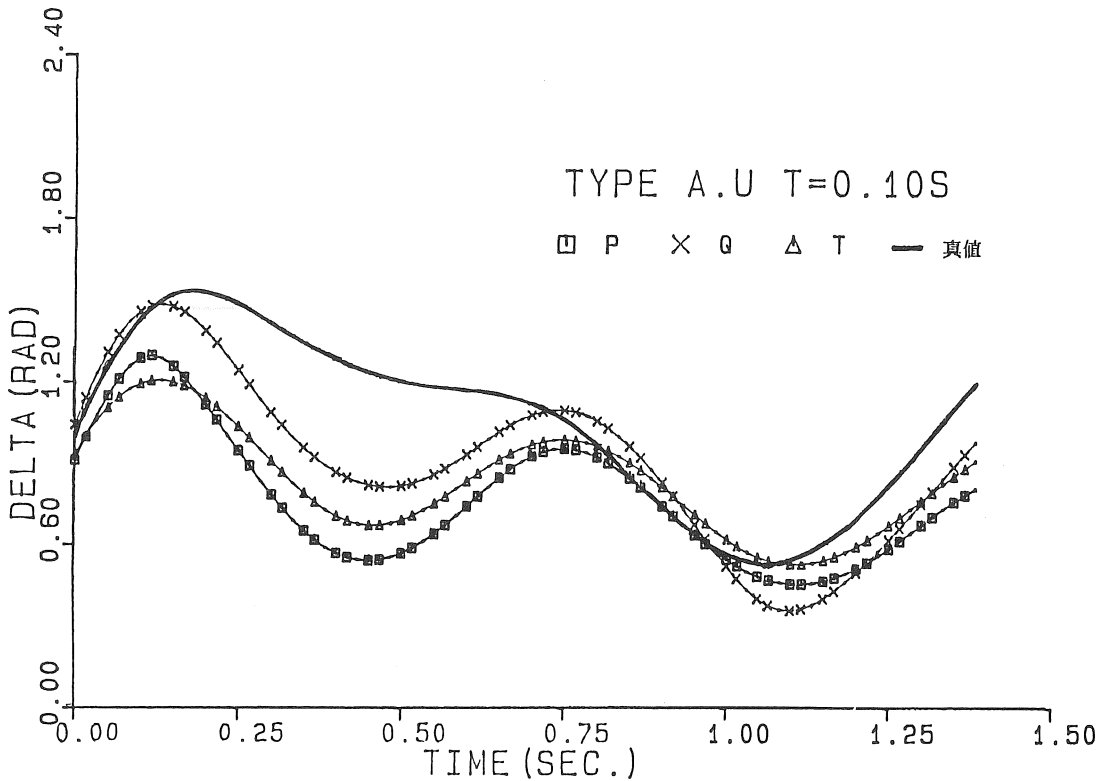


図4 等価リアクタンス推定による位相検出推移曲線

表2 推定した等価リアクタンス値変化による位相偏差評価指標の値

ケース	位相変動幅	モデル	Xe の変化			
			0.9Xe	1.0Xe	1.1Xe	1.2Xe
A E 10	1.50-2.35 (rad)	δ_p	3.42	3.42	3.42	3.42
		δ_a	2.99	0.88	2.54	9.27
		δ_t	3.01	1.00	0.66	1.12
A E 05	1.40-2.50 (rad)	δ_p	2.40	2.40	2.40	
		δ_a	2.46	0.44	1.39	
		δ_t	1.05	0.31	0.80	
B E 10	1.00-1.30 (rad)	δ_p	3.75	0.64	2.17	1.11
		δ_a	2.19	0.72	0.42	
		δ_t	1.03	0.26	1.01	
B E 05	1.00-1.18 (rad)	δ_p	3.67	0.53	1.69	
		δ_a	2.06	0.53	0.21	
		δ_t	0.90	0.13	0.92	

δ_p , δ_a , δ_t は(3), (4), (5)式による推定モデルである。

すなわち, δ_p は $\pi/2$ [rad], δ_a は0 [rad]の値付近では, $\partial\delta_p/\partial P$ および $\partial\delta_a/\partial Q$ の値が大きくなり, P, Q の誤差が大きく影響するためであると考えられる。

表1の等価リアクタンス Xe を用いて(3), (4), (5)式を利用することにより位相検出のシミュレーションを行った結果の一部を図3と図4に示す。図中の記号□, ×, △はそれぞれ(3), (4), (5)式について δ_p , δ_a , δ_t の計算結果を表わし, 真値の位相曲線は六機系統の動揺方程式を修正オイラー法により求めた結果である。

いずれの図においても三種の近似式のうち δ_t の位相検出推移曲線が真値の位相変化曲線に最も近接した結果となっている。しかし図4からみると, 重負荷状態では三種の近似式の何れに関しても SPD による推定の誤差は大きく, 無視し難い。

〈2-3〉等価リアクタンス推定誤差の位相検出結果に与える影響

SPD による位相検出結果を評価するために, 次式の評価指標を用いて検討を行う。

$$J = \int_{t_0}^{t_{rin}} [(\hat{\delta} - \delta)/\delta]^2 dt \quad (11)$$

ここで, t_{rin} は検出誤差を評価するための計算打切時刻, $\hat{\delta}$ は位相差の検出値で, δ はシミュレーション結果により得られる G_t の位相であり, これを真値としている。修正オイラー法による計算の時間間隔は0.0167秒となっており, t_{rin} は1.5秒としている。この指標 J の値が小さいほど位相検出の誤差が小さいといえることができる。

故障除去後の僅かな時間で推定した等価リアクタンスの推定値は過渡動揺の間は一定不変のものと仮定しているが, 実際にはある程度変化すると考えられる。このこ

とを検証するため, 等価リアクタンスが変化した場合の SPD による位相検出結果について(8)式の評価指標を調べ, 表2に示す。

表2から, Xe の推定誤差がないものとした場合(表では1.0Xe で表わす)には, δ_p , δ_a , δ_t の, それぞれの評価指標を比較すると, 図3～図4の視察による結果と同様に, δ_t の検出モデルは他の二つのモデルより優れていることがわかる。さらに, Xe を-10～+20%の範囲で変化させた場合(0.9Xe, 1.1Xe, 1.2Xe 等で示す)の評価指標でも, δ_t による検出モデルが他の場合よりも総合的に優れていることがわかる。

〈2-4〉まとめ

以上の結果により, 次の諸点を明確にすることができる。

(1) P, Q を同時に用いる位相検出モデル δ_t は比較的良好な結果を与えている。

もし, (3)式による P のみを用いる場合には, 位相差が $\pi/2$ [rad] 付近において, 逆 Sin 関数を使用するために, P の測定誤差が位相検出結果にあたる影響は大きく, 位相検出が不可能となることがある。(4)式により, Q のみを用いる場合には位相差が0 [rad] 付近において, 逆 Cos 関数を使用するために, 前述の P のみを用いる場合と同様の原因により誤差が大きくなる。

(2) シミュレーションによる位相検出を行うに先立って等価リアクタンスを推定するためには発電機位相動揺の1/4周期程度の時間(計算例では0.33秒)が必要である。

(3) SPD による位相検出は中程度以下の負荷レベル状態において, 比較的良好な結果を与えている。

(4) 重負荷状態における苛酷な条件下では SPD に

よる位相検出は誤差が大きい。

3. 等価リアクタンスを用いた非線形オブザーバによる位相検出

<3-1> 位相検出の非線形オブザーバ

SPD では、位相検出のため発電機端子における有効、無効電力 P , Q , および端子電圧 E の測定値のほか、等価リアクタンス X_e の推定値を用いている。ここで(3)~(5)式を用いて位相検出値 δ_p , δ_q , δ_t についてそれぞれの X_e に対する感度 $\partial\delta_p/\partial X_e$, $\partial\delta_q/\partial X_e$, $\partial\delta_t/\partial X_e$ を求めると次式となる⁵⁾。

$$\partial\delta_p/\partial X_e = \{1/(\cos\delta_p \cdot E_1)\}P \quad (12)$$

$$\partial\delta_q/\partial X_e = \{1/(\sin\delta_q \cdot E_1)\}Q \quad (13)$$

$$\partial\delta_t/\partial X_e = E^2 \cdot P/(E^2 - X_e \cdot Q)^2 \quad (14)$$

従って、 X_e の推定誤差は直接、位相検出誤差となって影響することがわかる。特に重負荷状態の場合には大きな P や Q の値に対して(12)~(14)式はいずれも大きな値となり、 X_e の推定誤差の影響を大きく受ける。位相検出の精度を上げるために、多機系統の等価一機無限大母線系統に対して、等価リアクタンスを用いた非線形オブザーバ^{6),7)}を構成することによる位相差の検出法について以下において検討する。

多機系統から導いた等価一機無限大母線系統に対する動揺方程式として、以下のモデルを用いる。

$$\dot{\delta} = \omega \quad (15)$$

$$\dot{\omega} = (\omega_0/M)(P_m - P_e - D\omega) \quad (16)$$

$$P_e = (E_1 E_\infty / X_e) \sin\delta \quad (17)$$

ここで

ω : 発電機の角速度

ω_0 : 基準角周波数

P_m : 発電機の機械入力

M : 慣性定数

D : 発電機の制動定数

である。なお、 X_e は前章で述べた方法で推定する。前述のように、三種の位相検出モデルのうち(5)式から得られる δ_t が最も良い結果を与えている。従って、以後 δ_t に対する検出モデルのみを使用して、等価リアクタンスを推定するものとする。

オブザーバは測定可能な変数のみを用いて全状態変数を推定する必要があるシステムに対して適用されるものであり、実システムの出力変数とオブザーバモデルの出力変数の差を再びオブザーバへフィードバックすることにより、状態の推定値を急速に真の状態変数へ漸近させることができる⁶⁾⁻⁸⁾。

(15)~(17)式で示した等価一機無限大母線系統のモデルに、等価リアクタンスの推定値を与えて、発電機の有効

電力 P_e または角速度 ω を観測量として用いて、次式のような二種類のオブザーバを構成する。

有効電力を観測量とする場合

$$\hat{\delta} = \hat{\omega} + K_1(P_e - \hat{P}_e) \quad (18)$$

$$\hat{\omega} = (\omega_0/M)(P_m - \hat{P}_e - D\hat{\omega}) + K_2(P_e - \hat{P}_e) \quad (19)$$

$$\hat{P}_e = (E_1 E_\infty / X_e) \sin\hat{\delta} \quad (20)$$

角速度を観測量とする場合

$$\hat{\delta} = \hat{\omega} + K_1(\omega - \hat{\omega}) \quad (21)$$

$$\hat{\omega} = (\omega_0/M)(P_m - \hat{P}_e - D\hat{\omega}) + K_2(\omega - \hat{\omega}) \quad (22)$$

$$\hat{P}_e = (E_1 E_\infty / X_e) \sin\hat{\delta} \quad (23)$$

ここで、 $\hat{\delta}$, $\hat{\omega}$, \hat{P}_e はそれぞれ発電機端子の位相差、角速度、有効電力の推定値であり、 P_e , ω および E_1 は測定値である。(18)~(20)式は \hat{P}_e と \hat{P}_e の偏差をフィードバック量として用いており、(21)~(23)式は ω と $\hat{\omega}$ との偏差をフィードバック量として用いている。

この二種類のフィードバック方式において、それぞれフィードバックゲイン値 K_1 と K_2 を適切に選択することによって、位相差の検出が可能となる。OBS を構成することによる位相検出法の適用例について以下に述べる。

<3-2> 系統モデルによる計算結果

オブザーバを適用するために対象とした多機系統モデルは六機系統モデルであり図2と同じである。しかし、詳細な比較検討を行うため、潮流状態として、さらに、一つの中位負荷状態を追加する。

重負荷状態(図2に示す潮流状態)をAとすれば、この場合は、故障除去後の位相変動は大きく、最終状態は不安定となる。中位負荷状態としてAの3/4の潮流状態をMとすれば、この場合は、故障除去後の位相変動は大きい、最終は安定となる。軽負荷状態としてAの1/2の潮流状態をBとすれば、この場合は位相変動が小さい。

各潮流状態のシミュレーション結果によれば、一般に、この系統は故障除去時刻の1.5秒後から安定と不安定のいずれかの状態に分かれることがわかる。それゆえ、後述するように位相検出誤差の収束状態を明確にするため、故障除去直後から1.5秒内とその後の1.0秒に分けて考察することが望ましい。各段の考察には、既述の(11)式の評価指標 J を使用する。ここで、評価指標 J の添字として数字を用いるが、前段の推定誤差を示す評価指標を J_{15} で表わし、後段のそれを J_{10} で表わし、さらに全体を通して得られる評価指標を J_{25} で表わすことにする。各指標の意味は図5に示す。

その位相偏差の最終収束の状況に注目し、その意義を強調するため、次式のような総合評価指標 SJF を選定する。

$$SJF = J_{25} + J_{10} = J_{15} + 2 \times J_{10} \quad (24)$$

この物理的意味は次のようである。位相偏差が過渡初

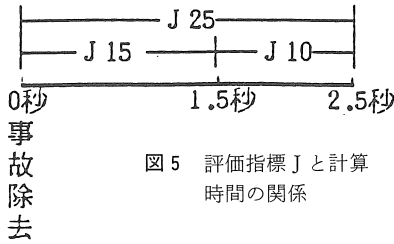


図5 評価指標Jと計算時間の関係

期の第一段J15で大きくても、第二段のJ10において、真値に接近し、偏差が小さくなるような位相検出を高く評価することを狙いとしている。このため、後段のJ10の項の荷重を大きく二倍に選んだ。ただし、潮流状態がAの状態の場合に限り、位相変動の最後は不安定であるから、J15の指標のみを利用して比較した。

オブザーバでは位相変動がいくつかの変数の関数であるから、以下の式のように示すことができる。

$$\delta = \phi(P, \omega, t, X_e) \quad (25)$$

ここで、主にSPDの計算結果と比較検討する。三種の潮流状態別、二種の故障継続時間別、三種の等価リアクタンス別における各ケースについて、OBSによる位相検出のシミュレーションを行い最適フィードバックゲイン値 K_1 、 K_2 を選択した。その結果を表3に示す。なお、参考のため、SPDによる位相検出シミュレーション結果の総合評価指標SJFを挙げておく。便宜上、評価指標のSJFの値は1/0.0167倍にとっている。

この表によると、各個別の系統状態に対して、OBSの評価指標SJFはSPDの評価指標SJFより小さく、OBSによる位相検出法はきわめて良い結果を得ることができる。フィードバックゲイン K_1 と K_2 の値の選定を任意にできると仮定した場合、 P_e によるフィードバックは ω のフィードバックより良い結果を得ている。

これは系統の各ケース別にフィードバックゲインの値 K_1 、 K_2 を最適となるよう選択した結果である。しかし、実際の系統運用において、オンラインの位相検出を目的とする場合には、負荷状態や故障条件のいずれの場合においても、多数の系統ケースの出現に対してゲイン値の K_1 、 K_2 を自在に変化させることはきわめて困難であり望ましくない。このため、各ケースについて、共通のゲイン値の選択が必要である。

推定した等価リアクタンスを利用し、各潮流状態と故障継続時間別に、フィードバックゲインの値 K_1 、 K_2 に対して得られる評価指標SJFの値がSPDによる場合よりも小さい範囲を図6と図7に示す。その共通区域をハッチングで示す。

P_e フィードバックによるOBSでは、図6でみると、 K_1 、 K_2 の値はそれぞれ4.5と220を選ぶことができる。しかし、系統状態の各ケースについて、その共通区域は非常に小さく、共通のゲイン値の選択は難しく、調整も困難であるので、 P_e によるフィードバックは実用性に乏しい。

ω フィードバックによるOBSでは、図7でみるよう

表3 OBSの最適ゲイン選定と総合評価指標

ケース	X_e の変化	OBS (P_e 利用)		OBS (ω 利用)		SPD
		K_1/K_2	SJF	K_1/K_2	SJF	SJF
AE10	0.9 X_e	3.0/220	0.53	1.025/45	0.03	34.43
	1.0 X_e	0.5/225	0.02	1.025/45	1.36	26.03
	1.1 X_e	4.5/215	0.11	1.175/41	0.36	22.37
ME10	0.9 X_e	1.5/225	0.05	1.225/44	0.10	0.82
	1.0 X_e	5.5/215	0.27	1.425/43	0.84	1.41
	1.1 X_e	11./220	0.38	1.500/44	1.94	4.06
BE10	0.9 X_e	-12/225	0.07	1.025/45	0.38	2.62
	1.0 X_e	7.5/215	0.05	1.500/45	0.16	0.38
	1.1 X_e	12./200	0.38	1.500/28	1.02	1.34
AE05	0.9 X_e	0.5/225	0.07	1.025/45	0.13	23.39
	1.0 X_e	4.5/215	0.12	1.150/40	0.31	18.63
	1.1 X_e	9.0/200	0.21	1.300/45	0.93	17.19
ME05	0.9 X_e	1.5/220	0.03	1.075/31	0.02	0.98
	1.0 X_e	7.0/210	0.14	1.350/40	0.58	0.72
	1.1 X_e	13./195	0.40	1.350/31	1.65	2.94
BE05	0.9 X_e	-12/215	0.05	1.025/45	0.37	2.56
	1.0 X_e	7.5/215	0.05	1.750/70	0.12	0.26
	1.1 X_e	12./200	0.29	1.500/31	0.93	1.22

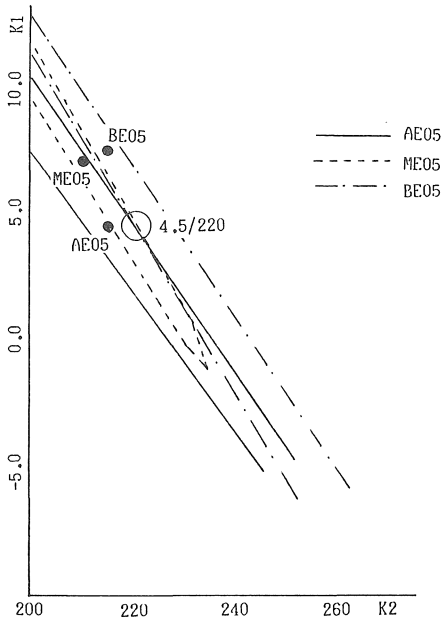


図 6 OBSの K_1 , K_2 ゲイン共通区域 (Pe利用)

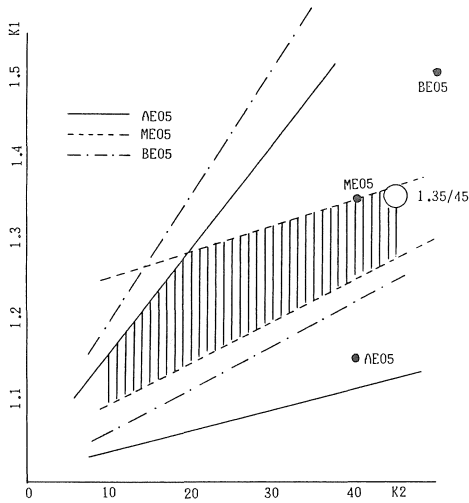


図 7 OBSの K_1 , K_2 ゲイン共通区域 (ω 利用)

に K_1 , K_2 の値はそれぞれ1.35と45を選ぶことができる。その共通区域は前者より大きく、実系統運用上からみて、メリットが大きいと思われる。

上述のように、実運用上の立場から系統状態の各ケースに共通な同値パラメータとして選択したフィードバックゲイン K_1 , K_2 の最良な一組の値と各ケースの総合評価指標 SJF の値を表 4 に示す。表 4 における OBS の評価指標値 SJF は表 3 のそれよりやや大きい値をとることは言うまでもない。

重負荷、中位負荷および軽負荷の各状態における故障除去後の OBS 利用による位相検出の状況を示す位相変化曲線を図 8～図10に示す。

図 8 の軽負荷レベルでは、SPD と OBS の位相検出上、位相偏差の相違はみられない。しかし、図 9 と図10のように、潮流状態が中位から重負荷に移るにともない、OBS の位相検出は優れており、真値の変化に追隨していく状態がよく観察される。

〈3-3〉 まとめ

以上の各種計算により、中程度以上の負荷状態の場合には、二つのフィードバック方式のうち、 ω フィードバックによる OBS のゲイン値の選択は、Pe フィードバックのそれより広い共通区域をもっている。この共通ゲインの値 K_1 と K_2 を使用する時、各発電機出力を相当大きく変化させても、SPD より望ましい結果を得ることができる。

等価リアクタンスを用いたオブザーバ構成による位相検出システムにおいて位相検出推移は検出開始の初期から真値に近く、かつ時間の経過とともに真値の変化に十分近接し、追隨していく特性をもつことがわかった。

4. 結 び

電力系統の実運用上、無限大母線を基準とした発電機の電圧位相差の検出はきわめて重要な意義がある。特に、位相差検出対象の発電機端子における P, Q, E などの

表 4 OBSゲイン K_1 , K_2 の共通値による計算結果 (Xe 不変)

ケース	OBS (Pe 利用)		OBS (ω 利用)		SPD
	K_1/K_2	SJF	K_1/K_2	SJF	SJF
AE10	4.5/220	1.00	1.35/45	1.05	26.03
ME10		0.95		0.98	1.41
BE10		0.42		0.25	0.38
AE05		1.25		0.67	18.63
ME05		0.75		0.59	0.72
BE05		0.33		0.17	0.26

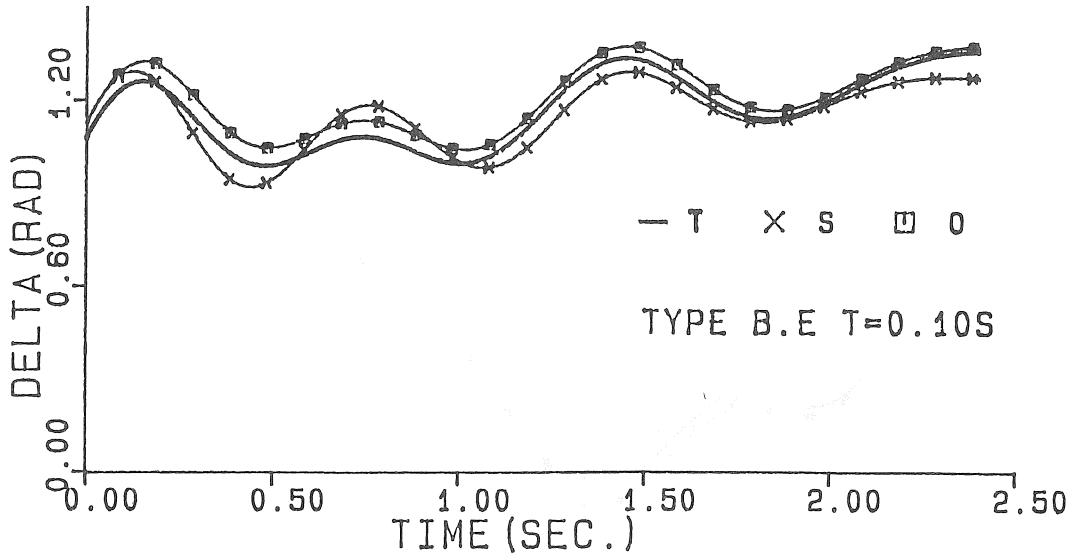


図8 OBS (ω 利用)とSPDの位相検出推移曲線
T-真値 S-SPD O-OBS

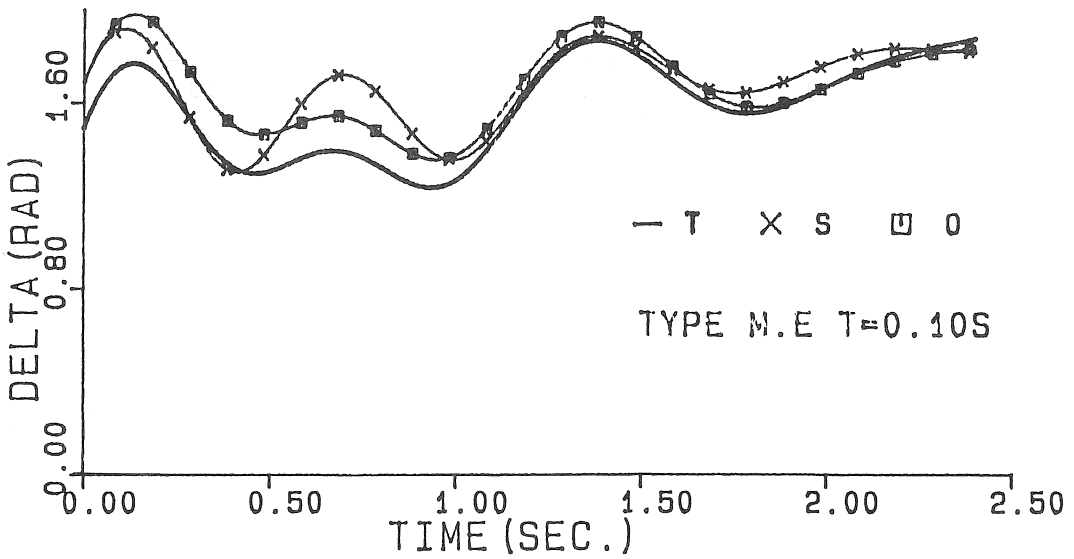


図9 OBS (ω 利用)とSPDの位相検出推移曲線
T-真値 S-SPD O-OBS

情報のみを利用して位相が検出できれば、たいへん有益である。ここでは、多機系統の一例として六機系統を取り上げ簡易位相検出システムに関して一機無限大母線系統モデルによる等価置換や適用の可能性を始めとし、等価リアクタンス法、非線形オブザーバの適用などを検討した。そして、次のように望ましい結果を得ることがで

きる。

SPDによる位相差検出は一般に中程度以下の負荷状態では、比較的良い検出結果を得ることができる。等価リアクタンスの推定誤差は±10%の範囲内にあることがわかった。

等価リアクタンスを用いた非線形オブザーバ構成によ

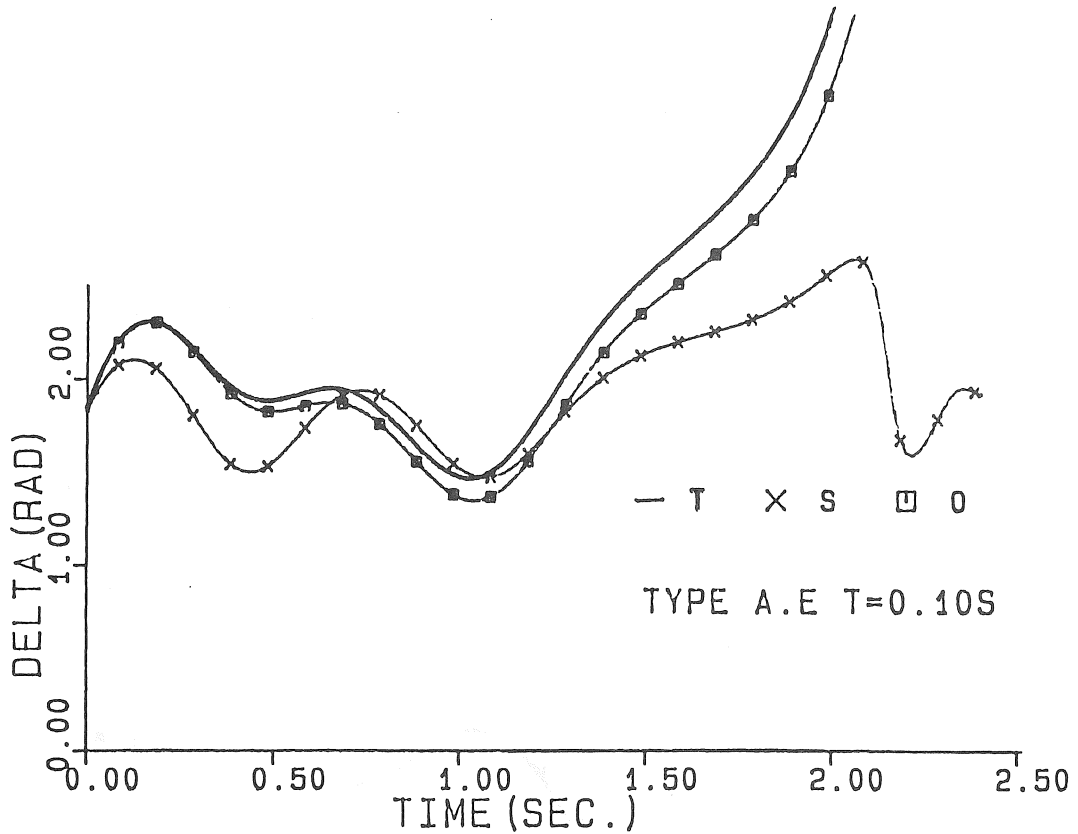


図10 OBS (ω 利用) と SPD の位相検出推移曲線
T-真値 S-SPD O-OBS

る、多機系統適用のための簡易形位相検出システムは重負荷の苛酷条件下でも追従特性が優れ利用可能であることを確めた。3章で P_e と ω のそれぞれのフィードバック方式について比較検討したが、この二方式のうち、 ω のフィードバック方式を選んだとき、 P_e フィードバック方式より共通ゲイン区域が広く、実系統への適用性が高いと考えられる。SPD では機械入力 P_t 、慣性定数 M などのパラメータ値を必要としないという簡便さがあるものの、重負荷状態では、位相検出の精度はあまり期待できない。一方、OBS では、機械入力、慣性定数などの発電機の値はあらかじめその値が判明していなければならないことなどがあるが、重負荷状態でも位相検出の精度に期待できるものがある。

今後は AVR、ガバナーなどの影響や実際測定上の問題、あるいは系統運転条件変更があるときの最適オブザーバゲイン値の早期決定などの手法について検討を行う。

参考文献

- 1) 一柳, 小林, 亀谷: マイクロコンピュータによる電力系統の簡易形位相検出器 電学論誌 B103No. 9 PP56-62 1983年9月
- 2) 一柳, 小林: 多機系統に適用する簡易形位相検出システム (AC/DC 模擬送電装置による検討) 電気学会全国大会 No.899 1983年
- 3) P. Bonanomi, R. Bertschi: On-Line Identification of an Equivalent Reactance for Stability Application IEEE Trans P.A.S Vol PAS-100 No.2 Feb. 1981
- 4) 一柳, 胡, 小林: 多機系統に適用する簡易形位相検出システム (六機系統モデルによる検討) 電気学会全国大会 No.915 1984年
- 5) 胡, 一柳, 小林: 多機系統に適用する簡易形位相検出システム (等価リアクタンス法を併用した非線形オブザーバの検討) 電気関係学会東海支部連合大

会 62 昭和59年

- 6) 伊藤：システム制御理論 昭晃堂 昭和51年
- 7) 中野, 美多：制御基礎理論 昭晃堂 昭和57年
- 8) 小木曾：交直並列送電系統の動的状態推定に関する
研究 愛知工業大学修士論文 昭和58年
(受理 昭和60年1月16日)